

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

З. Т. НАЗАРЧУК (головний редактор), Г. М. НИКИФОРЧИН (заст. головного редактора), Р. Р. КОКОТ (відповідальний секретар), О. Є. АНДРЕЙКІВ, Р. Є. ГЛАДИШЕВСЬКИЙ, І. М. ДМИТРАХ, З. А. ДУРЯГІНА, І. Ю. ЗАВАЛІЙ, О. І. ЗВІРКО, І. М. ЗІНЬ, Р. М. КУШНІР, Д. Б. КУРИЛЯК, О. П. ОСТАШ, В. В. ПАНАСЮК, І. М. ПОГРЕЛЮК, М. С. ПОЛУТРЕНКО, В. І. ПОХМУРСЬКИЙ, Т. О. ПРИХНА, М. П. САВРУК, М. Д. САХНЕНКО, В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, О. З. СТУДЕНТ, М. С. ХОМА, О. Е. ЧИГИРИНЕЦЬ, В. М. ФЕДІРКО, С. О. ФІРСТОВ, О. Т. ЦИРУЛЬНИК, П. В. ЯСНІЙ

## МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Р. АКІД (Великобританія), Г. БОЛЗОН (Італія), М. ЕЛЬБОВДЖАІНІ (США–Канада), Е. ГДУТУС (Греція), В. КЕЙН (Індія), Т. ЛАГОДА (Польща), Г. ЛЕСЮК (Польща), П. МОРЕЙРА (Португалія), А. ПІХ (Німеччина), Г. ПЛЮВІНАЖ (Франція), Я. ПОКЛЮДА (Чехія), Г. ШМІТТ (Німеччина), А. СЕДМАК (Сербія), Х. ТОРІБІО (Іспанія), Л. ТОТ (Угорщина), П. ТРАМПУШ (Угорщина), В. ЯРТИСЬ (Норвегія)

## EDITORIAL BOARD

Z. T. NAZARCHUK (Editor-in-Chief), H. M. NYKYFORCHYN (Deputy Editor-in-Chief), R. R. KOKOT (Secretary), O. Ye. ANDREIKIV, R. Ye. GLADYSHEVSKII, I. M. DMYTRAKH, Z. A. DURIAGINA, I. Yu. ZAVALIY, O. I. ZVIRKO, I. M. ZIN', R. M. KUSHNIR, D. B. KURYLIAK, O. P. OSTASH, V. V. PANASYUK, I. M. POHRELYUK, M. S. POLUTRENKO, V. I. POKHMURSKII, T. O. PRIKHNA, M. P. SAVRUK, M. D. SAKHNENKO, V. R. SKALSKIY, O. Z. STUDENT, M. S. KHOMA, O. E. CHYHYRYNETS', V. M. FEDIRKO, S. O. FIRSTOV, O. T. TSYRUL'NYK, P. V. YASNIY

## INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

R. AKID (Great Britain), G. BOLZON (Italy), M. ELBOUJDAINI (USA–Canada), E. GDOUTOS (Greece), V. KAIN (India), T. LAGODA (Poland), G. LESIUK (Poland), P. MOREIRA (Portugal), A. PICH (Germany), G. PLUVINAGE (France), J. POKLUDA (Czech Republic), G. SCHMITT (Germany), A. SEDMAK (Serbia), J. TORIBIO (Spain), L. TÓHT (Hungary), P. TRAMPUSH (Hungary), V. YARTYS' (Norway)

Відповідальний за випуск д-р техн. наук, проф. Г. М. Никифорчин  
Responsible for issue Dr. (Engn.), Prof. H. M. Nykyforchyn

**Адреса редакції:** 79601, Львів МСП, Наукова, 5, Фізико-механічний інститут  
ім. Г. В. Карпенка НАН України. Тел.: (032) 263-73-74,  
(032) 229-62-30. Факс: (032) 264-94-27.  
E-mail: journal.pcmm@gmail.com

**WWW-address:** <http://pcmm.ipm.lviv.ua>

**Editorial office address:** Karpenko Physico-Mechanical Institute, 5, Naukova St.,  
Lviv 79601, Ukraine. Tel.: (38) 032 263-73-74,  
(38) 032 229-62-30. Fax: (38) 032 264-94-27.  
E-mail: journal.pcmm@gmail.com

Відповідальний секретар редакції **Р. Р. Кокот**

Редактори *Д. С. Бриняк, О. Т. Досин, Л. Є. Єлейко*

Технічний редактор *І. В. Калинюк*

Зав. групою комп'ютерної підготовки видання *І. В. Калинюк*

Комп'ютерний набір *Л. Г. Колчак, Г. М. Кулик*

---

Підписано до друку 26.02.2021. Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 12.  
Умовн. фарбо-відбитків 12,5. Тираж 180 прим. Замовлення 050321 від 05.03.2021. Ціна договірна.  
Реєстраційне свідоцтво серія ДК № 5068 від 22.03.2016  
Друкарня ТзОВ "Простір-М", 79000, Львів, вул. Чайковського, 8

---

© ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г. В. Карпенка НАН УКРАЇНИ,  
"ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ", 2021

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г. В. КАРПЕНКА

# ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ

Міжнародний науково-технічний журнал  
Заснований у січні 1965 року  
Виходить 6 разів у рік

**ТОМ 57, № 5, 2021**

вересень – жовтень

## ЗМІСТ

- Скальський В. Р., Романишин І. М., Мокрий О. М., Семак П. М.*  
Оцінювання пошкодженості матеріалів акустичними методами  
(Огляд). Ч. 1.....5
- Описано прямі і непрямі методи оцінювання пошкодженості, в тому числі за густиною матеріалу, розміром зерна, відносними змінами параметрів, із використанням підходів, заснованих на явищі акустичної емісії. Вказано на переваги та обмеження традиційних ультразвукових методів оцінювання за швидкістю і загасанням різних типів хвиль.
- Ключові слова:** *пошкодженість, розмір зерна, швидкість поширення ультразвукових хвиль.*
- Куриляк Д. Б., Назарчук З. Т., Войтко М. В., Кулинич Я. П.* Дифракція  
SH-хвилі на міжфазному дефекті у з'єднанні пружного шару  
з півпростором.....13
- Розв'язано задачу про дифракцію пружної SH-хвилі на дефекті, утвореному на межі жорсткого з'єднання пружного шару з півпростором. Дефект змодельовано імпедансною півплощиною, на якій задані крайові умови мішаного типу. Методом Вінера–Гопфа отримано точний розв'язок задачі, який використано для дослідження поведінки коефіцієнтів трансформації мод падаючої хвилі на вершині дефекту, енергетичних коефіцієнтів відбивання та проходження хвиль у різні підобласті структури як функцій геометричних та фізико-механічних параметрів задачі. Фізично проаналізовано формування поля зміщень на вільній поверхні шару для діагностування краю дефекту.
- Ключові слова:** *дифракція, дефект, імпеданс, метод Вінера–Гопфа, пружний шар.*
- Звірко О. І., Студент О. З., Андрейко І. М., Курилас М. С., Палаш Р. В.*  
Ознаки корозійно-втомної експлуатаційної пошкодженості  
нержавкої сталі пластин теплообмінника.....25
- Розглянуто випадок експлуатаційного розвитку наскрізних пошкоджень у тонких пластинах теплообмінників, які розділяють рідкі технологічне і охолоджувальне середовища, що змінило їх функціональні властивості через змішування середовищ. Пластини виготовлено зі сталі типу 18Cr–8Ni зі незначним вмістом

молібдену, в якій виявили схильність до корозійного та корозійно-механічного руйнування в обох середовищах. Мікрофрактографічним аналізом встановлено, що пошкодження зумовлені корозійним пітингоутворенням та корозійно-втомним руйнуванням сталі, насамперед, у місцях контактування ребер на суміжних пластинах. На ділянках локальної пластичної деформації внаслідок контактної втоми спостерігали інтенсивне двійникування, яке найімовірніше й сприяло корозійному міжкристалітному росту тріщин.

**Ключові слова:** *нержавка хромо-нікелева сталь, теплообмінник, корозійна втома, мікрофрактографічний аналіз.*

*Андрейків О. Є., Долінська І. Я., Настасяк С. В., Шефер М. С.* Визначення залишкового ресурсу торсіона за впливу корозивного середовища.....32

Розроблено розрахункову модель для визначення залишкового ресурсу торсіона (циліндра) за довготривалого закруту в умовах дії корозивного середовища. В основу моделі покладено побудоване диференціальне рівняння кінетики поширення корозійно-механічної тріщини від початкового до граничного її розміру. Оцінено залишковий ресурс торсіона зі сталі 45ХН2МФА з півеліптичною тріщиною, площина якої напрямлена під кутом 45° до його осі за дії довготривалого закруту.

**Ключові слова:** *торсіон, залишковий ресурс, корозійно-механічна тріщина, корозивне середовище, розрахункова модель.*

*Пустовий В. М., Семенов П. О., Немчук О. О., Греділь М. І., Нестеров О. А., Стрельбіцький В. В.* Деградація сталей наднормативно експлуатованого перевантажувального обладнання.....38

Розглянуто особливості оцінювання експлуатаційної деградації сталей листового прокату перевантажувального обладнання. Встановлено, що ударна в'язкість як показник опору крихкому руйнуванню є однією з визначальних механічних характеристик для забезпечення роботоздатності металоконструкцій, а її катастрофічне зниження спричинене мікророзшаруваннями між волокнами структури та витягнутими неметалевими включеннями. Для підвищення чутливості оцінювання деградації сталей слід надавати перевагу випробуванням поперечних щодо напрямку вальцювання зразків. Для наднормативно експлуатованих конструкцій рекомендовано граничне значення ударної в'язкості на рівні 30 Дж/см<sup>2</sup>, за якого очікують високий ризик неконтрольованого руйнування.

**Ключові слова:** *портовий кран, вальцьована сталь, експлуатаційна деградація, мікророзшарування, ударна в'язкість.*

*Труш В. С., Стоєв П. І., Лук'яненко О. Г., [Воєводін В. М.], Погрелюк І. М., Федірко В. М., Ковтун К. В., Кравчишин Т. М.* Вплив окиснення на властивості приповерхневого шару металів IV групи (Ti, Zr, Hf).....46

Подано характеристики приповерхневого шару d-елементів IV групи (титану, цирконію і гафнію) після дифузійного насичення з контрольованого кисневмісного газового середовища ( $T = 750^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 5 \text{ h}$  при  $P = 1,33 \cdot 10^{-1} \text{ Pa}$ ;  $1,33 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$ ;  $1,33 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$ ). Показано, що формується зміцнений дифузійний шар без фазової плівки з вищою твердістю порівняно з матрицею металу в зворотному порядку їх спорідненості до кисню. Показано відмінності у зовнішньому вигляді поверхні зразків до і після термообробки.

**Ключові слова:** *титан, цирконій, гафній, хіміко-термічна обробка, кисневмісне середовище, приповерхневий шар, мікротвердість, приріст маси.*

Василів Б. Д., Подгурська В. Я., Остап О. П., Даніленко І. А., Шило А. В.  
Вплив відновлювально-окиснювального циклування на фізико-механічні властивості кераміки системи  $ZrO_2-Y_2O_3-CeO_2-Al_2O_3-NiO-CuO$ .....52

Досліджено вплив одноразового відновлення та відновлювально-окиснювального циклування (redox cycling) при  $600^\circ C$  у різних воденьвмісних середовищах без та за наявності діоксиду вуглецю на міцність та електропровідність кераміки системи  $ZrO_2-Y_2O_3-CeO_2-Al_2O_3-NiO-CuO$  за зниженого вмісту  $Y_2O_3$  та різного співвідношення кількості керамічної і металеві фаз. Встановлено, що кермети із різною масовою часткою нікелевої фази після відновлення в чистому водні мають високу електропровідність, що відповідає вимогам до анодних матеріалів, однак, навіть за відсутності об'ємного мікророзтріскування, їх міцність після відновлення знижена у 2 рази. Для досліджених керамік у вихідному стані та керметів після відновлення при  $600^\circ C$  у різних робочих середовищах характерний квазів'язкий мікромеханізм руйнування. Redox-обробка керметів спричиняє незначне підвищення їх електропровідності, але забезпечує їм близьку до вихідної кераміки міцність, тобто є ефективною технологією поліпшення фізико-механічних властивостей Ni-вмісних анодів твердооксидних паливних комірок, у тому числі за наявності в робочому середовищі домішок  $CO_2$ .

**Ключові слова:** кераміка системи  $ZrO_2-Y_2O_3-CeO_2-Al_2O_3-NiO-CuO$ , воденьвмісне середовище, діоксид вуглецю, redox-обробка, міцність, електропровідність.

Веделі Д. В., Григор'єв О. М., Осінов А. Є., Мазур П. В. Вплив високотемпературного окиснення на міцність кераміки на основі  $ZrB_2$ .....59

Залишкова міцність композиційної кераміки на основі бориду цирконію після окиснення при  $1500^\circ C$  з витримкою 50 h та при  $1600^\circ C$  з витримкою 2 h складає більше 50% від початкової. Виявлено, що знеміцнення матеріалу спричиняють неоднорідності в окалині у вигляді відшарування окремих зерен чи груп зерен діоксиду цирконію від основи, особливо в системі  $ZrB_2-15\% SiC$ . З додаванням  $Mo_2C$ ,  $WC$ ,  $W_2B_5$  залишкова міцність підвищується через формування щільніших та тонших окиснених шарів. Однак через пори та тріщини не вдається її зберегти. Збереження початкової міцності досягають у системі  $ZrB_2-15\% MoSi_2$ , де утворюються щільна окалина та дрібні зерна оксиду цирконію в ній під час окиснення. На залишкову міцність впливає структура окалини, товщина, розмір включень в ній та внутрішні напруги.

**Ключові слова:** ультрависокотемпературна кераміка, борид цирконію, окиснення, залишкова міцність.

Бабінець В. І., Кобзарук О. В., Смажило Б. В. Підвищення опору фретинг-корозійній втоми пресових з'єднань у морській воді.....68

Подані нові технологічні і конструктивні методи підвищення фретинг-корозійної втоми пресових з'єднань, що використовують у судновому машинобудуванні. Розроблено та експериментально випробувано вдосконалену конструкцію пресового з'єднання вал-маточина, що дає можливість збільшити його експлуатаційну надійність і довговічність за втоми в природній морській воді.

**Ключові слова:** фретинг-корозійна втома пресового з'єднання вал-маточина, морська вода, поляризаційно-оптичний метод, картина смуг (ізохром).

Тимусь М. Б., Зінь І. М., Хлопик О. П., Похмурський В. І., Головчук М. Я., Корній С. А. Інгибування корозії алюмінієвого сплаву композицією гуарової камеди та сегнетової солі.....73

Досліджували інгибування корозії дюралюмінієвого сплаву природним полімером – гуаровою камеддю (ГК). Встановлено, що її ефективність інгибування ко-

розі в 0,1% розчині хлориду натрію суттєво збільшується поєднанням в одній композиції зі сегнетовою сіллю (СС). Згідно з результатами електрохімічної імпедансної спектроскопії та рентгенівського енергодисперсійного мікроаналізу поверхні сплаву, в корозивному розчині, інгібованому композицією ГК + СС, формується адсорбційна плівка, яка забезпечує ступінь захисту металу понад 90%. Досліджувана інгібіторна композиція ефективно діє на механічно активованій поверхні дюралюмінієвого сплаву, що робить її перспективною для застосування в умовах трибокорозії.

**Ключові слова:** корозія, алюмінієвий сплав, хлоридовмісне середовище, гуарова камедь, сегнетова сіль, електрохімічна імпедансна спектроскопія, сканівна електронна мікроскопія, ступінь захисту.

*Квасницька Ю. Г., Іваськевич Л. М., Балицький О. І., Квасницька К. Г.,  
Мяльниця Г. П.* Структурно-механічні властивості нікелевого сплаву  
лопаток газотурбінних двигунів.....82

Досліджено вплив структури на фізико-механічні властивості легованого ренієм і танталом (4,07 і 2,62 mass% відповідно) жароміцного корозійнотривкого сплаву. Оптимізуванням режиму термічної обробки досягнуто однорідної дисперсної мікроструктури з повним розчиненням  $\gamma$ - $\gamma'$ -евтектики та високою об'ємною часткою зміцнювальної  $\gamma'$ -фази у матричному твердому розчині  $\gamma$ -фази. Експериментально встановлено, що фізико-механічні властивості і тривала міцність нового сплаву відповідають експлуатаційним вимогам до робочих лопаток турбіни сучасного газотурбінного двигуна енергетичного призначення.

**Ключові слова:** жароміцний корозійнотривкий нікелевий сплав, термічна обробка, лопатка турбіни, тривала міцність.

*Коломієць В. В., Антоценков Р. В., Фабричнікова І. А., Богданович С. А.,  
Галич І. В.* Фізико-механічні параметри під час оброблення різанням  
наплавлених покриттів.....89

Досліджено фізико-механічні параметри під час точіння наплавлених покриттів інструментами із надтвердого матеріалу на основі нітриду бору (гексаніту-Р). Встановлено, що під час точіння інструментом із гексаніту-Р усадка стружки, кути зсуву і довжина контакту стружки із передньою поверхнею інструмента мають невисокі значення. Малі коефіцієнти тертя і сили різання під час обробки наплавлених матеріалів забезпечують підвищену стійкість інструментів із гексаніту-Р, а високі температури дають змогу ними обробляти наплавлені матеріали на великих швидкостях.

**Ключові слова:** фізико-механічні параметри, наплавлені матеріали, гексаніт-Р.

*Булик І. І., Кононюк О. П., Бовда В. О.* Вплив умов помелу на структурний  
стан порошоків спінінгованого сплаву на основі  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ .....95

Методами рентгенівського фазового аналізування та електронної сканувальної мікроскопії досліджено вплив умов розмелювання спінінгованого сплаву на основі  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  на властивості порошоків – фазово-структурний стан, анізотропію і морфологію. Властивості порошоків оцінено, згідно з вимогами для подальшого здрібнення їх мікроструктури та спікання у водні за понижених температур, методом диспропорціонування та рекомбінування. Встановлено, що з підвищенням частоти і тривалості помелу у водні і олеїновій кислоті дисперсність порошоків підвищується, збільшується кількість лускоподібних частинок, сплав частково аморфізується, а ступінь текстури знижується. Показано, що оптимальним є помел в олеїновій кислоті з  $v \approx 100 \text{ rpm}$  і  $\tau \leq 12 \text{ h}$ .

**Ключові слова:** сплав КС25, помел, водень, фазово-структурний стан, морфологія, анізотропні частинки.

Дурагіна З. А., Тростянчин А. М., Кулик В. В., Ваврух В. І., Філімонов О. С.

Особливості тонкої структури та локального напруженого стану сталі 13X11H2B2MФ за циклічного навантаження..... 103

Методом трансмісійної електронної мікроскопії досліджено зміну тонкої структури сталі 13X11H2B2MФ, характеру розподілу дислокацій та локальних внутрішніх напружень за деформаційного впливу під час випробувань на малоциклового втому. Виявлено, що у вихідному металі субмікроструктура без видимих концентраторів напружень та різкого градієнта густини дислокацій. Після деформаційного впливу в зоні руйнування формується градієнтна дислокаційна структура та виникають локальні внутрішні напруження, значно вищі у мартенситі та біля меж зерен, ніж у фериті та в тілі зерен.

**Ключові слова:** сталі феритно-мартенситного класу, субмікроструктура, густина дислокацій, локальні внутрішні напруження.

Вербило Д. Г., Кузьменко М. М., Даниленко В. І., Подрезов Ю. М., Кулак Л. Д., Фірстов С. О. Опір повзучості титанового сплаву

системи Ti–Al–Si–X за короткотривалих випробувань згином..... 108

Досліджено опір високотемпературній (650°C) повзучості відомого сплаву BT25Y та експериментального ЖТ19 системи Ti–Al–Si–X (X – Zr, Mo, Nb, Sn) за короткотривалих (упродовж 3 h) випробувань згином призматичних зразків. Запропоновано відповідні характеристики опору повзучості матеріалів, за якими сплав ЖТ19 переважає сплав BT25Y.

**Ключові слова:** титанові сплави, високі температури, повзучість, короткотривалі випробування, згин.

Швайко М. Ю. Основні засади та межі застосовності теорії пластичності,

заснованої на концепції ковзання і постулаті ізотропії Льюшина..... 112

Проаналізовано диференціально-нелінійний варіант теорії пластичності, яка задовольняє відомі фундаментальні принципи і постулати механіки деформівного твердого тіла та враховує взаємовплив механізмів непружного деформування матеріалів. Аналітичні та чисельні експериментальні дослідження засвідчили можливість і перспективність її використання для опису непружного деформування полікристалічних матеріалів за простого і складного навантажень. Особливу увагу приділено формулюванню та розв'язуванню задач про стійкість елементів конструкцій з урахуванням пам'яті матеріалу.

**Ключові слова:** пластичність, складне навантаження, стійкість.

Прокопишин І. І., Стягар А. О. Числове дослідження контакту пружних

тіл, одне з яких має несучільне тонке покриття..... 125

Розглянуто задачу про контакт двох пружних тіл, одне з яких має несучільне тонке пружне покриття у вигляді оболонки типу Тимошенка. Для розв'язування варіаційного рівняння цієї задачі запропоновано алгоритм декомпозиції області типу Робіна, який застосовано для дослідження контактної взаємодії двох прямокутних пружних тіл з несучільним покриттям. Проаналізовано залежність поверхневих і еквівалентних напружень від висоти і жорсткості покриття. Порівняно результати, отримані зі застосуванням теорії оболонок типу Тимошенка та класичної теорії пружності для моделювання покриття.

**Ключові слова:** *контакт пружних тіл, тонкі покриття, оболонки типу Тимошенка, нелінійні варіаційні рівняння, методи декомпозиції області, метод скінченних елементів.*

*Кундрат М. М.* Відшарування підсилювального елемента півплощини за циклічного навантаження..... 134

За умов плоскої задачі досліджено відшарування жорсткого гнучкого підсилення для півплощини за навантаження циклічними напруженнями на безмежності. Відшаруванню передують розвиток локалізованих зон передруйнування (ослабленого контакту), яким можуть відповідати області накопичення пошкоджень, часткового розриву зв'язків тощо. Отримано аналітичні залежності для зміни робочої довжини підсилення залежно від амплітуди навантаження та кількості циклів.

**Ключові слова:** *підсилення, відшарування, зона передруйнування, робоча довжина, кількість циклів.*

*Онищук О. О.* Вплив фільтрувального шару з наночастинок срібла та оксиду магнію на фізико-хімічні властивості води..... 138

Подано результати досліджень впливу шару з наночастинок срібла та оксиду магнію ( $MgO-Ag$ ) як фільтра на твердість води і вміст заліза та фосфору. Встановлено, що після застосування такого фільтрувального шару концентрація заліза та фосфору зменшується. Виявлено, що внаслідок насичення води частинками срібла та оксиду магнію твердість води зменшується, а хімічний склад стає якісніший.

**Ключові слова:** *фільтр, наночастинки  $MgO-Ag$ , структура, срібло, оксид магнію, твердість води, йони, залізо та поліфосфати.*

## ЮВІЛЕЇ

**Віктор Миколайович Федірко** (до 75-річчя від дня народження)..... 142

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE  
H. V. KARPENKO PHYSICO-MECHANICAL INSTITUTE

# PHYSICO-CHEMICAL MECHANICS OF MATERIALS

International Scientific-Technical Journal  
Founded in January 1965  
Published bimonthly

**VOLUME 57, № 5, 2021**

September – October

---

---

## CONTENTS

- Skalskyi V. R., Romanyshyn I. M., Mokryi O. M., and Semak P. M.* Assessing damageability of materials by acoustic methods (Review). P. 1.....5

Direct and indirect methods of damage assessment are described, including by the material density, grain size, relative changes in parameters, using approaches based on the phenomenon of acoustic emission. The advantages and limitations of traditional ultrasonic methods for estimating damage by velocity and attenuation of different types of waves are shown.

**Keywords:** *damage, grain size, velocity of propagation of ultrasonic waves.*

- Kuryliak D. B., Nazarchuk Z. T., Voytko M. V., and Kulynych Ya. P.* Diffraction of SH-wave at the interface defect in the joint of the elastic layer with a half-space.....13

A problem of diffraction of elastic SH-wave on the interface defect formed on of the rigid joint of the elastic layer and a half-space is solved. The defect is modeled by a semi-infinite plane with the impedance boundary mixed-mode conditions on the surface. Using the Wiener–Hopf technique the rigorous solution is obtained. The behavior of the coefficients of transformation of modes of a scattered wave at the tip of the defect, the energy coefficients of reflection/transmission and the displacement fields on the free surface of the layer depending on the parameters of the problem is investigated.

**Keywords:** *diffraction, defect, impedance, Wiener–Hopf technique, elastic layer.*

- Zvirko O. I., Student O. Z., Andreiko I. M., Kurylas M. S., and Palash R. V.* Signs of corrosion-fatigue service damages of stainless steel of heat exchanger plates.....25

The case of operational development of through-damage in thin plates of heat exchangers, which separate liquid technological and cooling media, violated their functional properties due to mixing of environments, is considered. The plates are made of 18Cr–8Ni type steel with a low content of molybdenum, which showed a tendency to corrosion and corrosion-mechanical fracture in both media. Microfractographic analysis revealed that the damage is due to the processes of corrosion pitting and corrosion fatigue failure of steel, primarily in the places of contact of the ribs on adjacent plates. Intense twinning was observed in the areas of local plastic



deformation due to contact fatigue, which most likely contributed to the corrosive intergranular crack growth.

**Keywords:** chromium nickel stainless steel, heat-exchanger, corrosion fatigue, microfractographic analysis.

Andreikiv O. Ye., Dolinska I. Ya., Nastasiak S. V., and Shefer M. S.

Determination of residual life of a torsion bar under corrosion environment effect.....32

Calculation model for determination of the torsion bar (cylinder) liferesidual resource under long-term twist under corrosion environment effect has been developed. The model is based on the constructed differential equation of the kinetics of corrosion-mechanical crack propagation from its initial to its ultimate size. The residual life of the torsion bar made of 45XH2MΦA steel with a semi-elliptical crack, the plane of which is directed at an angle of 45° to torsion bar axis under the action of long-term turning has been estimated.

**Keywords:** torsion, residual resource, corrosion-mechanical crack, corrosion environment, calculation model.

Pustovyi V. M., Semenov P. O., Nemchuk O. O., Hredil M. I., Nesterov O. A., and Strelbitskyi V. V. Degradation of steel of excessively used reloading equipment.....38

Peculiarities of operational degradation of rolled steels of reloading equipment are considered. It is found that impact toughness as an indicator of brittle fracture resistance is one of the defining mechanical characteristics to ensure the operability of metal structures, and its catastrophic decrease is caused by microdelaminations between the structure layers and elongated non-metallic inclusions. To increase the sensitivity of assessing the steel degradation, transverse specimens with respect to the rolling direction are preferable for the impact testing. The limit value of impact strength of 30 J/cm<sup>2</sup> is recommended for excessively operated structures, at which a risk of uncontrolled fracture is high.

**Keywords:** port crane, rolled steel, operational degradation, microdelamination, impact toughness.

Trush V. S., Stoev P. I., Luk'yanenko A. G., Voyevodin V. N., Pohrelyuk I. M.,

Fedirko V. M., Kovtun K. V., and Kravchyshyn T. M. The influence of oxidation on the properties of near-surface layer of metals of the IV group (Ti, Zr, Hf).....46

Characteristics of the near-surface layer of d-elements of the IV group (titanium, zirconium and hafnium) after thermal diffusion saturation from a controlled oxygen-containing gas medium ( $T = 750^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 5 \text{ h}$  at  $P = 1.33 \cdot 10^{-1} \text{ Pa}$ ;  $1.33 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$ ;  $1.33 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$ ) have been studied. It is shown that the diffusion layer is formed with a higher hardness compared to the metal matrix in the order inverse to their affinity for oxygen. It is revealed that under the selected conditions of heat treatment only a hardened diffusion layer without a phase film is formed. Differences in the appearance of the surface of the samples before and after heat treatment are shown.

**Keywords:** titanium, zirconium, hafnium, chemical-thermal treatment, oxygen-containing medium, near-surface layer, microhardness, weight gain.

Vasylyiv B. D., Podhurska V. Ya., Ostash O. P., Danilenko I. A., and Shylo A. V.

The influence of redox cycling on physicomechanical properties of  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-NiO-CuO}$  ceramics.....52

The effect of one-time reduction and redox cycling at 600°C in different hydrogen-containing environments without and with carbon dioxide on the strength and elect-

rical conductivity of the  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ - $CeO_2$ - $Al_2O_3$ - $NiO$ - $CuO$  ceramics at low  $Y_2O_3$  content and different amount of the ceramic and metal phases has been investigated. It is found that cermets with different weight fractions of the nickel phase after reduction in pure hydrogen have high electrical conductivity, which meets the requirements for anode materials. However, even in the absence of bulk microcracking, their strength after reduction is reduced by 2 times. The studied ceramics in the as-sintered state and cermets after reduction at  $600^\circ C$  in different working environments are characterized by a quasi-ductile fracture micromechanism. Redox cycling of these anode materials causes a slight increase in their electrical conductivity, but provides their strength close to the as-sintered ceramics. Thus, it serves as an effective technology to improve the physicomaterial properties of Ni-containing solid oxide fuel cell anodes, including the case of the  $CO_2$  impurities presence in working environments.

**Keywords:** *ceramics of  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ - $CeO_2$ - $Al_2O_3$ - $NiO$ - $CuO$  system, hydrogenous environment, carbon dioxide, redox cycling, strength, electric conductivity.*

*Vedel D. V., Grigoriev O. N., Osipov A. E., and Mazur P. V.* The influence of high-temperature oxidation on the strength of  $ZrB_2$ -based ceramics.....59

The residual strength of composite ceramics based on zirconium boride after oxidation at a temperature of  $1500^\circ C$  with holding time 50 h, and at a temperature of  $1600^\circ C$  with holding time 2 h is more than 50% of the as sintered materials. It is shown that the softening of ceramics occurs due to the formation of homogeneities in the scale in the form of delamination of individual grains or groups of grains of zirconium dioxide from the base, especially in the  $ZrB_2$ -15% SiC system. The addition of  $Mo_2C$ , WC,  $W_2B_5$  increases the residual strength due to the formation of the denser and thinner oxidized layers. However, the pores and cracks do not allow maintaining the original strength. This is due to the formation of dense scale, a smaller grain size of zirconium oxide in the scale during oxidation, which is achieved in the  $ZrB_2$ -15%  $MoSi_2$  system. Factors affecting residual strength include scale structure, thickness, size of scale inclusions, and internal stresses.

**Keywords:** *ultra-high temperature ceramics, zirconium boride, oxidation, residual strength.*

*Babinets V. I., Kobzaruk O. V., and Smagilo B. V.* Increasing the fretting-corrosion fatigue of press joints in sea water.....68

New technological and constructive methods for improvement of the fretting-corrosion fatigue of press-fit connection used in ship building are presented. An improved design of the shaft-hub press-fit connection has been developed and experimentally tested, which makes it possible to increase its operational reliability and fatigue life in natural sea water.

**Keywords:** *fretting-corrosion fatigue of a press-fit shaft-hub connection, sea water, polarization-optical method, strip pattern (isochrom).*

*Tymus M. B., Zin I. M., Khlopyk O. P., Pokhmurskii V. I., Holovchuk M. Ya., and Korniy S. A.* Aluminum alloy corrosion inhibition by composition of guar gum and tartrate.....73

Inhibition of corrosion of duralumin alloy by natural polymer guar gum (GG) was investigated. It was found that the effectiveness of its corrosion inhibition in 0.1% sodium chloride solution significantly increased by its combination in one composition with tartrate salt (TS). According to the data of electrochemical impedance spectroscopy and X-ray energy dispersion microanalysis of the alloy surface in a corrosive solution inhibited by the composition of GG and TS, an adsorption film is formed, which provides a degree of the metal protection over 90%. The investigated

inhibitory composition effectively acts on the mechanically activated surface of the duralumin alloy, which makes it promising for use in conditions of tribocorrosion.

**Keywords:** *corrosion, duralumin alloy, chloride solution, guar gum, tartrate salt, electrochemical impedance spectroscopy, scanning electron microscopy, degree of protection.*

*Kvasnytska Y. H., Ivaskevich L. M., Balitskii A. I., Kvasnytska K. H., and Mialnitsa H. P.* Structural-mechanical properties of nickel alloy of gas turbine engine blades.....82

The influence of the structure on the physico-mechanical properties of a new heat-resistant corrosion-resistant alloy doped with rhenium and tantalum has been studied. The optimal heat treatment mode is determined, which forms a homogeneous, dispersed microstructure with a high volume fraction of the strengthening  $\gamma'$ -phase in the matrix solid solution of the  $\gamma$ -phase and complete dissolution of the  $\gamma$ - $\gamma'$ -eutectic. Experimental studies of the samples after the specified heat treatment show that the physico-mechanical properties and long-term strength of the new alloy meets the operational requirements of the turbine blades of a gas turbine engine for energy purposes.

**Keywords:** *heat-resistant corrosion-resistant nickel alloy, heat treatment, turbine blade, long-term strength.*

*Kolomiyets V. V., Antoshchenkov R. V., Fabrychnikova I. A., Bohdanovych S. A., and Halych I. V.* Physico-mechanical parameters under cutting of deposited surfaces.....89

Physico-mechanical parameters under turning of deposited coatings with tools of super-hard material based on boron nitride (hexanite-R) are investigated. It is established that during turning with hexanite-P cutters, the values of chip shrinkage, shear angles and length of the chip contact with the front surface of the cutters are small. Small values of friction coefficients and cutting forces during processing of the deposited materials provide high resistance of the hexanite-R cutters. High temperatures allow us to process the weld materials at high cutting speeds.

**Keywords:** *physico-mechanical parameters, weld material, hexanite-R.*

*Bulyk I. I., Kononiuk O. P., and Bovda V. O.* The influence of milling conditions on the structural state of powders of melt spinning  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  based alloy.....95

The influence of milling conditions of a spinning alloy based on  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  on the properties of powders – phase-structural state, anisotropy and morphology – was studied by X-ray phase analysis and electron scanning microscopy. The properties of powders were evaluated in accordance with the requirements for further milling of their microstructure and sintering in hydrogen at low temperatures by the method of disproportionation and recombination. It was established that with increasing frequency and duration of milling in hydrogen and oleic acid the dispersion of powder particles increased, the number of scaly particles increased, the alloy was partially amorphized, and the degree of texture decreased. It was shown that milling in oleic acid with  $v \approx 100$  rpm and  $\tau \leq 12$  h was optimal.

**Keywords:** *KS25 alloy, milling, hydrogen, phase-structural state, morphology, anisotropic particles.*

*Duriagina Z. A., Trostianchyn A. M., Kulyk V. V., Vavrukh V. I., and Filimonov O. S.* Peculiarities of fine structure and local stress state of 13Kh11N2V2MF steel under cyclic loading.....103

Transmission electron microscopy (TEM) was used to study the change in the fine structure of 13Kh11N2V2MF steel, the character of dislocation density distribution and the level of local internal stresses under deformation influence during low-cycle fatigue test. It is shown that in the initial metal the submicrostructure hasn't visible structural stress concentrators and a sharp dislocation density gradient. As a result of deformation, a gradient dislocation structure is formed and local internal stresses arise in the failure zone, that are much higher in the martensitic component and near the grain boundaries than in the ferritic component and in the grain body.

**Keywords:** *ferritic/martensitic steel, submicrostructure, dislocation density, local internal stresses.*

*Verbylo D. G., Kuzmenko M. M., Danylenko V. I., Podrezov Yu. M., Kulak L. D., and Firstov S. O.* Creep resistance of Ti–Al–Si–X titanium alloys under short-term bending tests.....108

High-temperature (650°C) creep resistance of the known BT25Y alloy and experimental ЖТ19 alloy of the Ti–Al–Si–X (X = Zr, Mo, Nb, Sn) system under short-term (within 3 h) bending tests of prismatic samples was studied. The corresponding characteristics of materials creep resistance are proposed according to which ЖТ19 alloy prevails BT25Y alloy.

**Keywords:** *titanium alloys, high temperatures, creep, short-term tests, bending.*

*Shvaiko M. Yu.* Basic principles and limits of application of the plasticity theory based on the concept of sliding and Illushin isotropy postulate.....112

Differential nonlinear variant of the theory of plasticity which satisfied known and fundamental principles and postulates of the mechanics of solid body deformation and takes into account mutual influence of the mechanism of non-elastic deformation of materials is analyzed. Analytical and numeric experiments proved the possibility and perspectives of the use of the proposed theory of plasticity for the description of the non-elastic deformation of polycrystal materials under the simple and complex loading. Peculiar attention is paid to the formulation and solution of the problems of the structural elements strength with the reference to the material memory.

**Keywords:** *plasticity, complex loading, endurance.*

*Prokopyshyn I. I., and Styahar A. O.* Numerical analysis of contact between elastic bodies one of which has a nonuniform thin coating .....125

The problem of contact between two elastic bodies, one of which has a nonuniform thin elastic coating in the form of Timoshenko-type shell, is considered. Domain decomposition algorithm of Robin-type for solving a variational equation of this problem is proposed. Obtained algorithm is used for the investigation of contact interaction between two rectangular elastic bodies with a nonuniform coating. The dependence of the surface and equivalent stresses on the height and the rigidity of the coating is analyzed. The results, obtained by the algorithms, in which the Timoshenko-type shell theory as well as the classical elasticity theory are used to model the coating, are compared.

**Keywords:** *contact of elastic bodies, thin coatings, Timoshenko-type shells, nonlinear variational equations, domain decomposition methods, finite element method.*

*Kundrat M. M.* Exfoliation of the element of reinforcement of a half plane under cyclic loading.....134

Exfoliation of the flexible rigid reinforcement for the plane problem under cyclic stress loading on infinity is investigated. The development of localized prefracture zones (weakened contact), which may correspond to the area of the damage, partial

rupture of bonds, etc. precedes the exfoliation. Analytical dependences for changing the working length of the reinforcement depending on the amplitude of the load and the number of cycles are obtained.

**Keywords:** *reinforcement, exfoliation, prefracture zone, working length, number of cycles.*

*Onyshchuk O. O.* The influence of filtrating layer of silver nanoparticles and magnesium oxide on physicochemical properties of water .....138

The results of researches of the influence of a layer of silver and magnesium oxide (MgO–Ag) nanoparticles as a filter on water hardness and admissible content of iron and phosphorus are presented. It is found that after the application of such a filter layer, the content of iron and phosphorus decreases. It is established that due to the saturation of water with particles of silver and magnesium oxide, the water hardness decreases and the better chemical composition of tap water is observed.

**Keywords:** *filter, MgO–Ag nanoparticles, structure, silver, magnesium oxide, hardness of water, ions, iron and polyphosphates.*

#### JUBILEES

**Viktor Mykolayovych Fedirko** (to the 75<sup>th</sup> birthday).....142